VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

СТАНДАРТ ОСНОВНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ АСТРОНОМИИ

Вилен Валентинович Нестеров

Лекции для студентов старших курсов

Наблюдать и объяснять

Предлагаемый вам курс лекций ранее не читался и был специально придуман. Излагаемый материал может оказаться полезным в практической работе астронома. Специальных пособий нет, но вся полезная информация разбросана по многим источникам.

О чём будет рассказано в наших лекциях?

Вот вы проходили различные предметы. В сферической астрономии вам объясняли, что есть системы координат, в которых может быть задано положение объектов. В небесной механике вы изучали движение объектов, занимались определением орбит. Это важные вопросы, но взятые отдельно, они висят в воздухе, в них нет постановки практических задач. Данный курс объединяет и делает завершёнными эти предметы.

С давних времён человек стремился найти отражение своей души на небе. Всех людей объединяла астрономия. Но в ходе развития целые ветви нашей науки выделились в самостоятельные разделы, со своими методами и способами постижения природы, со своими популяризаторами и авторитетами. Это было прекрасное столетие астрономии, но ныне

оно закончилось. Произошёл виток спирали, и нет различных ветвей, а опять осталась одна наука — астрономия, со своей первоначальной и единственной задачей — наблюдать и объяснять.

Вот только несколько примеров. В середине двадцатого века появились атомные часы: время хранили астрометристы, а часы изобрели физики. Для решения научных и практических задач проектируют и запускают специальные искусственные спутники Земли. Развитие вычислительной техники происходит прямо на наших глазах. То, что раньше казалось недоступным, теперь стало реальным. Компьютеры сами порождают задачи. Факт истории: когда в ГАИШ ставили БЭСМ-4, то полагали, что на все астрономические вычисления машине будет достаточно пяти минут в сутки, но даже круглосуточной работы не хватало для удовлетворения запросов сотрудников и студентов. Астрофизики составляют каталоги, используют астрометрию для выявления релятивистских эффектов. Международная небесная система координат опирается на радиоинтерферометрические наблюдения далёких квазаров. Все интересные работы проводятся там, где смыкаются различные разделы астрономии.

Считать надо уметь

Вычисления — неотъемлемая часть астрономии.

Общая схема научной работы: измерения — вычисление — построение модели. Прежде каждый человек решал только часть большой задачи, либо измерял, либо думал о модели. Теперь один коллектив обязан заниматься всей совокупностью этих вопросов, а считать все должны уметь.

Для того чтобы считать, необходимо математическое обес-

печение. В него входят: звёздные каталоги, теории движения и теории вращения планет Солнечной системы, математические таблицы, формулы для вычислений.

Математические таблицы изготавливались в течение 300 лет, были настольными книгами вычислителей, а теперь они не нужны, расчёты выполняет компьютер.

Формулы для вычислений — вот раздел, который обязательно должен фигурировать в наших лекциях. Прежде многие формулы были приближёнными. Теперь ЭВМ позволяет использовать точные формулы.

Все эти элементы — куски астрометрии, небесной механики, сферической астрономии — направлены на решение ровно одной задачи:

даны

координаты и скорости объекта в начальный момент времени в заданной системе координат,

требуется найти

координаты и скорости объекта в любой момент в произвольной системе координат.

Обратная задача:

надо найти момент времени, для которого координаты и скорости объекта принимают фиксированные значения.

Все обратные задачи — неопределённые, ибо явления повторяются. Обратные задачи требуют ограничения интервала времени, на котором ищется решение, и последовательных приближений. Для решения таких задач необходимо искусство.

Вот таков круг вопросов, которые будут рассмотрены, и это то, что называется основными вычислениями астрономии. В практической работе встречаются постоянно, являются составной частью важных и полезных исследований. У нас в

ГАИШ можно наблюдать: столкнувшись с подобной задачей, сотрудники идут за помощью к профессору К.В. Куимову, он не подведёт и быстро за всех всё посчитает. Конечно, он и студентам уделяет много сил и времени, но будет гораздо полезнее, если вы научитесь выполнять вычисления самостоятельно.

Задачей данного курса лекций является описание небольшого количества исходных процедур так, чтобы можно было с их помощью решить основную проблему астрономии на основе стандарта.

Стандарт, нельзя нарушить

В научном мире появилась осознанная необходимость проводить все вычисления единообразно, стандартно. Обрабатывая, редуцируя наблюдения с различными константами и по различным приближённым формулам, мы сделаем их несопоставимыми. Стандарт, принятый астрономами на своих съездах, не должен быть нарушен вплоть до новых соглашений.

В 1976 году на съезде МАС принята новая система астрономических постоянных. Установлена новая стандартная эпоха J2000.0. Принята барицентрическая экваториальная система отсчёта. Новая система получена в результате анализа большого числа наблюдений.

Даны рекомендации: применять точные формулы, вычислять в прямоугольной системе координат.

Итак, константы МАС1976 плюс точные формулы — это и есть стандарт.

Новая стандартная эпоха, обозначаемая J2000.0 - дата 2000, январь 1.5, совпадающая с юлианской датой JD2451545.0, новое стандартное равноденствие соответствует этому моменту.

Единица времени, используемая в фундаментальных формулах учёта прецессии - юлианское столетие продолжительностью в 36525 суток.

Несколько позже, в 1980 году, в качестве стандарта для вычисления нутации была принята модель, построенная Варом.

В резолюциях МАС 1991 года содержатся важные рекомендации, в одной из которых закрепляется, что пространство - время не может быть представлено математически в рамках единой координатной системы отсчёта. Для того чтобы обрабатывать современные астрономические наблюдения, необходимо использовать несколько релятивистских систем отсчёта. Каждая из них привязана к центру масс совокупности рассматриваемых тел и имеет свою шкалу координатного времени.

В качестве списка звёздных положений, устанавливающего инерциальную систему координат, был принят каталог FK5, основная часть которого содержит сведения для 1535 звёзд. Затем появилась рекомендация о подготовке к установлению системы, основанной на положениях далёких радиоисточников. Исследования и наблюдения прошли успешно. В 1998 году Международная небесная опорная система была реализована на основе высокоточных экваториальных координат 608 внегалактических радиоисточников. Списком ярких звёзд, положения, собственные движения и параллаксы которых получены в новой опорной системе, является каталог, ставший одним из важнейших результатов космического астрометрического эксперимента HIPPARCOS.

Начнём, пожалуй

Несколько слов о начальных данных. Это координаты и скорости небесных объектов на заданный момент времени. К сожалению, нет забитого гвоздя на небе, нет неизменного направления. Коперник был прав в идейно - философском отношении и не прав фактически.

Начальные данные для звёзд приводятся в звёздных каталогах. Для полного определения положения в пространстве-времени необходимы шесть величин

$$\alpha, \delta, \pi, \mu_\alpha, \mu_\delta, \dot{\rho}$$

- прямое восхождение, склонение, параллакс, собственные движения по прямому восхождению и склонению и лучевая скорость.

Каталог HIPPARCOS, представленный мировому научному сообществу в 1997 году, содержит параметры $\alpha, \delta, \mu_\alpha \cos\delta, \mu_\delta, \pi$ более чем для 100000 звёзд. В этот список входят почти все звёзды ярче девятой звёздной величины. В каталог включены и фотометрические данные в шкалах B, V.

Опорный каталог Тихо (TRC1) содержит четыре величины $\alpha, \delta, \mu_\alpha \cos\delta, \mu_\delta$ и два фотометрических параметра B_t, V_t для почти одного миллиона звёзд.

Лучевые скорости известны для очень небольшой, порядка одной тысячи, выборки звёзд.

В силу необходимости, для большинства звёзд мы находимся на сфере.

Теории движения планет — другой класс начальных данных. Основные эфемериды в аналитической форме создавались с 1850 по 1920 годы. В их появлении большая заслуга Урбана Леверрье, заведующего Бюро Долгот Франции, и Саймона Ньюкома, директора Национального Ежегодника США.

Обе теории оставались в силе до 1984 года, так как их было трудно сопоставить и сравнить между собой.

Формулы и таблицы основных эфемерид позволяют вычислять гелиоцентрические эклиптические координаты планет, отнесенные к среднему мгновенному равноденствию. Смысл теории в аналитической форме: каждая координата представлена в виде основного движения и суммы тригонометрических членов - возмущений.

В годы повсеместного распространения и освоения вычислительной техники был проверен новый способ хранения эфемеридной информации: вместо публикации таблиц положений объектов координаты аппроксимировали полиномами по времени на интервалах несколько суток, коэффициенты полиномов распространялись по свету на магнитных носителях. Если на ЭВМ удавалось прочесть полученную информацию, то положения планет на любой момент времени вычислялись почти моментально на основе исходных полиномов.

В 1976 году на съезде МАС принято решение отказаться от тригонометрических эфемерид в качестве стандарта и перейти на результаты численного интегрирования движения больших планет и Луны.

Координаты планет на основе численных и аналитических эфемерид временами сильно отличаются, расхождения составляют до 10000 км в расстоянии и $1'' - 5''$ в эклиптической долготе. Расходятся между собой различные численные интегрирования. По координатам X, Y, Z - до 300 километров, а по величине $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ - до 10 километров. Это следует из специфики радиолокационных наблюдений. Расстояния внутренних планет от Земли определены с высокой точностью, однако угловые величины известны до сих пор плохо. На вопрос, что лучше - нет ответа, но мы должны сле-

довать стандарту, стандарт же предполагает использование результатов численного интегрирования.

Причина в прогрессе

Причина в прогрессе: вторая половина двадцатого века - эпоха освоения космоса - поставила перед учёными новые задачи. Точности вычислений уже было недостаточно. Не было также возможности в течение короткого времени улучшить известные тригонометрические ряды. Баллистические расчёты, выполняемые в космических центрах двух держав - СССР и США - опирались на метод численного интегрирования, что полностью себя оправдало с первых же шагов. Все космические эксперименты и дальние полёты оказались обеспечены надёжными эфемеридами планет и Луны.

В семидесятых годах двадцатого века в Институте Теоретической астрономии АН СССР сделана интереснейшая попытка создания теории движения планет в форме, объединяющей преимущества аналитических и численных методов. Основные теоретические положения разработаны доктором В. А. Брумбергом и доктором Г. А. Красинским. Первым итогом стала вычислительная программа АТ-1, с помощью которой обрабатывались радиолокационные наблюдения поверхности Марса. К этому проекту удалось привлечь внимание нескольких организаций, расширить методику и под руководством академика В. А. Котельникова построить численную релятивистскую теорию движения внутренних планет Солнечной системы, удостоенной хлопотами неутомимого профессора М. Д. Кислика в начале восьмидесятых Государственной премии СССР. К сожалению, изначальная закрытость работы и вынужденные замены вычислительной техники не позволили

подготовить удобный для пользователей вариант теории.

Большой парк вычислительных машин позволил сотрудникам Лаборатории реактивного движения США продолжить дело Ньюкома и Хилла. На первом этапе большую помощь оказал им доктор Дирк Брауэр. На протяжении более сорока лет численные модели движения планет Солнечной системы совершенствуются и развиваются. Мировой общественности известны общие направления работы, перечень факторов, принимаемых во внимание, численные значения используемых постоянных и, что самое приятное, для всех пользователей доступны окончательные результаты исследований в виде эфемеридных данных, то есть коэффициентов полиномов Чебышева. Сам процесс вычислений не комментируется и не обсуждается в открытой печати. Созданные программные продукты, банк наблюдательных данных, труднейшие моменты работы, которые удалось преодолеть, - всё это является интеллектуальной собственностью небольшого коллектива из десяти - пятнадцати человек. Подключиться к этим исследованиям со стороны невозможно, очень трудно даже добиться совпадения эфемеридных данных на основе собственного процесса интегрирования с начальными условиями, полученными Лабораторией реактивного движения.

В Лаборатории реактивного движения США численное интегрирование проводилось на интервале 44 столетия. Это позволило, с одной стороны, охватить все известные астрономические явления древности и, с другой стороны, корректно определить среднее положение плоскости эклиптики и численное значение угла наклона эклиптики к среднему экватору на стандартную эпоху J2000.0.

В ходу эфемерида...

В ходу эфемерида DE200/LE200, охватывает промежуток времени с 1800 по 2050 годы. Пользователям доступны также небольшие куски данных самых последних версий численных теорий движения.

В процессе создания численного массива DE200/LE200 использовались следующие значения отношения массы Солнца к массе планет

Sun	1
Mercury	6023600.00
Venus	408523.50
Earth+Moon	328900.50
Mars	3098710.00
Jupiter	1047.35
Saturn	3498.00
Uranus	22960.00
Neptune	19314.00
Pluto	130000000.00
Earth	332946.0379476187
Moon	27068708.7489041655

и коэффициент $\mu = 0.01230002$, равный отношению массы Луны к массе Земли.

Эфемерида DE200/LE200 включает в себя все новейшие научные разработки. Численное интегрирование уравнений движения выполнено в инерциальной системе отсчёта с началом в барицентре Солнечной системы. В качестве аргумента интегрирования использовано равномерное барицентрическое динамическое время - прямой потомок эфемеридного времени. Учтены релятивистские эффекты. Система гравитирующих тел дополнена пятью массивными астероидами.

За основную плоскость выбрана плоскость экватора, фиксированного на эпоху J2000.0. Использованы радиолокационные наблюдения планет земной группы, лазерные наблюдения Луны и данные о параметрах движения космических аппаратов при сближении их с большими планетами. Результаты аналитической теории движения четырёх внутренних планет, созданной Ньюкомом, приняты во внимание самым непосредственным образом: новые численные эфемериды составлены так, что наилучшим образом совпадают с аналитическими эфемеридами Ньюкома на интервале времени от 1850 до 1895 годов.

В уравнениях движения Луны относительно Земли учитываются отличия фигур этой тесной парочки от идеального шара. Впервые проводится совместное интегрирование уравнений движения и вращения в рамках моделей твёрдых Земли и Луны, что позволяет независимым способом учитывать явления прецессии, нутации и либрации, или, в некоторых вариантах, держать их под строгим контролем. Упругость Земли учитывается с помощью эмпирического параметра запаздывания приливов. Этот параметр подобран так, чтобы численное интегрирование дифференциальных уравнений приводило, с одной стороны, к вековому замедлению вращения Земли, около двух миллисекунд за сутки, и, с другой стороны, к эффекту эмпирического ускорения, то есть медленному удалению Луны от нашей планеты. Оба явления необъяснимы в рамках модели твёрдых тел.

Затраты огромны

Как и все динамические теории, эфемериды в Лаборатории реактивного движения разрабатываются методом последова-

тельных приближений. Есть по крайней мере четыре группы дифференциальных уравнений: для планет земной группы, для внешних планет, для движения Луны и для вращения Земли и Луны. Самый маленький шаг численного интегрирования составляет 0.08 суток. Это необходимо для точного представления положения Луны и барицентра системы Земля - Луна. В уравнениях движения внешних планет шаг интегрирования значительно больше, но о его величине как и о структуре последовательных приближений мы можем только догадываться.

Затраты вычислительного времени огромны. Для N планет необходимо численно интегрировать $6 \times N$ дифференциальных уравнений первого порядка. Для улучшения на основе наблюдений шести начальных параметров движения каждой из планет

$$x_0, y_0, z_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$$

требуется выполнить численное интегрирование ещё $6 \times 6 = 36$ дифференциальных уравнений первого порядка. Это даст значения для 36 изохронных производных

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial x_0} & \frac{\partial y}{\partial x_0} & \cdots & \frac{\partial \dot{z}}{\partial x_0} \\ \frac{\partial x}{\partial y_0} & \frac{\partial y}{\partial y_0} & \cdots & \frac{\partial \dot{z}}{\partial y_0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x}{\partial \dot{z}_0} & \frac{\partial y}{\partial \dot{z}_0} & \cdots & \frac{\partial \dot{z}}{\partial \dot{z}_0} \end{pmatrix}$$

на каждый момент наблюдений. Начальные условия для вычисления изохронных производных получают последовательными вариациями каждого из улучшаемых параметров

$$\begin{pmatrix} x_0 + \Delta x & y_0 & \dots & \dot{z}_0 \\ x_0 & y_0 + \Delta y & \dots & \dot{z}_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_0 & y_0 & \dots & \dot{z}_0 + \Delta \dot{z}_0 \end{pmatrix}$$

В ИПА РАН в последнее десятилетие выполнена тончайшая работа по моделированию всего процесса получения эфемериды Лаборатории реактивного движения в отечественных условиях. На интервале времени, равном пятидесяти годам, получено совпадение положений больших планет с точностью до одного метра. Успешные исследования продолжаются. Наши коллеги из Санкт-Петербурга намерены существенно расширить систему дифференциальных уравнений и включить в неё уравнения движения трёхсот малых планет. Несколько лет назад об этом нельзя было даже помыслить.

Запинка с преобразованием

Все вычисления должны быть стандартными и использовать выражения для прямоугольных координат.

Сферические координаты объектов $\alpha, \delta, r, \dot{\alpha}, \dot{\delta}, \dot{r}$ можно преобразовать к декартовым координатам $x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ по формулам

$$x = r \cdot \cos\delta \cdot \cos\alpha,$$

$$y = r \cdot \cos\delta \cdot \sin\alpha,$$

$$z = r \cdot \sin\delta.$$

$$\dot{x} = \frac{x}{r} \cdot \dot{r} - y \cdot \dot{\alpha} - z \cdot \cos\alpha \cdot \dot{\delta},$$

$$\dot{y} = \frac{y}{r} \cdot \dot{r} + x \cdot \dot{\alpha} - z \cdot \sin\alpha \cdot \dot{\delta},$$

$$\dot{z} = \frac{z}{r} \cdot \dot{r} + r \cdot \cos\delta \cdot \dot{\delta},$$

Здесь α, δ - не обязательно экваториальные координаты, это могут быть и эклиптические долгота и широта. Расстояние до звезды может быть вычислено при помощи параллакса или приравнено единице, если параллакс не известен. Второй вариант используется для экваториальных координат Опорного

каталога Тихо. В этом случае шестимерный вектор принимает вид $\alpha, \delta, 1, \dot{\alpha}, \dot{\delta}, 0$.

Обратное преобразование

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

$$\sin\delta = \frac{z}{r}, \cos\delta = \sqrt{1 - \sin^2\delta}, -90^\circ \leq \delta \leq +90^\circ,$$

$$\sin\alpha = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \cos\alpha = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, 0^\circ \leq \alpha < +360^\circ,$$

$$\dot{r} = \frac{x}{r} \cdot \dot{x} + \frac{y}{r} \cdot \dot{y} + \frac{z}{r} \cdot \dot{z},$$

$$\dot{\delta} = \frac{\dot{z} - (z/r) \cdot \dot{r}}{\sqrt{x^2 + y^2}},$$

$$\dot{\alpha}\cos\delta = \frac{\cos\alpha \cdot \dot{y} - \sin\alpha \cdot \dot{x}}{r}.$$

Когда объект находится в полюсе системы, его координата α не определена, при составлении программы ей можно дать любое значение.

Ещё один входной параметр — это время, может быть выражено в самых разнообразных формах. Наиболее удобная форма — сквозная нумерация суток, предложена Скалигером. Счёт дат идет от 1 января 4713 года до нашей эры. Юлианские сутки начинаются в полдень.

В спутниковой геодезии употребляется модифицированный юлианский день, MJD=JD-2400000.5, начало суток смещено в полночь.

Запишем алгоритм, который по заданной дате григорианского календаря позволяет вычислять юлианскую дату. Для этого введём обозначения $Day, Month, Year$ для дня, месяца и года. Будем использовать функцию $Int(x)$ для обозначения целой части числа x.

Если $Month < 3$ то $y = Year - 1$ и $m = Month + 12$, иначе $y = Year, m = Month$.

Вспомогательные величины $A = Int(y/100)$ - целое число столетий и $B = 2 - A + Int(A/4)$ - учёт того, что последний год только одного столетия из четырёх окажется високосным.

Юлианская дата равна

$$JD = Int(365.25*y) + Int(30.6001*(m+1)) + Day + 1720994.5 + B.$$

Запишем обратный алгоритм. Дана юлианская дата JD, вычислим день, месяц и год.

$$x = JD + 0.5, Z = Int(x), F = x - Z,$$

$$q = Int((Z - 1867216.25)/36524.25), A = Z + 1 + q - Int(q/4),$$

$$B = A + 1524, C = Int((B - 122.1)/365.25),$$

$$D = Int(365.25 * C), E = Int((B - D)/30.6001).$$

$$Day = B - D - Int(30.6001 * E) + F.$$

Если $E < 13.5$ то $Month = E - 1$ иначе $Month = E - 13$.

Если $Month < 2.5$ то $Year = C - 4715$, иначе $Year = C - 4716$.

Оттуда и сюда

Всякое наблюдение — это два события, испускание излучения и приём сигнала. Объект и приёмник излучения связаны пространственно - временной траекторией света. Свет не обязан распространяться прямолинейно, но отклонения весьма малы. Стандарт предполагает учёт явлений теории относительности.

Появились новые виды измерений. Это могут быть частоты, фазы, результаты лазерной локации, цифровые данные

с ПЗС матрицы. Все наблюдения выполняются из перемещающейся точки, объекты тоже смещаются. Необходимо иметь точное описание движения наблюдателя, понимать последствия, вызванные этим движением, а также знать состав среды распространения света.

Для приёмника излучения, расположенного на поверхности Земли, характерны следующие движения: прецессия и нутация, вращение Земли, движение полюсов, приливные смещения.

Модели и их следствия прежде были основаны на классической механике, теперь многое изменилось. Измерена величина максимального отклонения луча света в гравитационном поле Солнца, составившая $1''.745$. Предсказано и наблюдается вековое смещение перигелия орбиты планеты Меркурий. Для Земли мы определяем не классическую прецессию, а суммарное отклонение точки Весеннего равноденствия.

Что можно сказать об этих эффектах? Во многих случаях они не имеют влияния на измеряемые параметры, получаемые астрономами. Наблюдения выполняются на больших угловых расстояниях от Солнца, движение перигелия определяется не по формулам, а суммарно, то есть релятивистские эффекты напрямую мы пока не чувствуем. Но наблюдательный процесс уже вышел на рубеж, когда в моделях при редукциях надо учитывать все известные факторы и делать это единообразно.

Ничего абсолютного кроме относительности

Нам необходимо избрать единую систему отсчёта и шкалу времени.

Эту проблему следует отличать от вопросов использования

систем координат. Система отсчёта связана с совокупностью материальных тел. Система координат — абстрактное построение, зависящее от вкуса и удобства.

Раздельное рассмотрение пространства и времени некорректно. Нет ничего абсолютного, есть пространство-время.

Принимается четырехмерная система отсчёта:

1. начало координат находится в барицентре системы,
2. пространство-время асимптотически плоское с удалением от начала координат,
3. оси координат ортогональны в любой точке к оси времени,
4. три пространственные оси суть геодезические линии, вычисляемые без учёта гравитационных эффектов самой системы.

Это и есть собственная система отсчёта, координата t в этой системе — собственное время. Собственной системой отсчёта для Солнца является барицентрическая система отсчёта BRF, для Земли — земная система отсчёта TRF. Шкала времени для Солнечной системы — TDB, динамическое барицентрическое время, для Земли — TDT, земное динамическое время. В стандарте МАС1976 для Солнца единицы измерений — это астрономическая единица и сутки, для Земли — метр и секунда. В барицентрической системе отсчёта все положения небесных тел даны относительно среднего экватора и равноденствия новой стандартной эпохи J2000.0.

Предыдущая система, задаваемая положениями звёзд четвёртого Фундаментального каталога, была отнесена к среднему экватору и равноденствию эпохи B1950.0=JD2433232.4235925. Новая система может быть

связана со старой путём учёта поправки к постоянной прецессии и поправки прямого восхождения точки Весеннего равноденствия на 0.035 секунды времени в эпоху B1950.0.

В земной системе отсчёта TRF основная плоскость — фиксированный экватор. Именно к этой системе отнесены реальные наблюдения.

За поворотом перенос

В каждой системе отсчёта может быть много систем координат. Рассмотрим алгоритмы перехода между ними. Таких алгоритмов два - перенос и поворот.

Пусть $\vec{R}, \dot{\vec{R}}$ - вектор положения и вектор скорости наблюдателя в заданной системе координат, $\vec{r}, \dot{\vec{r}}$ - соответствующие параметры объекта в той же системе. Вектор $\vec{r'} = \vec{r} - \vec{R}$ задает положение объекта, а вектор $\dot{\vec{r'}} = \dot{\vec{r}} - \dot{\vec{R}}$ скорость объекта относительно точки наблюдения. Таких преобразований приходится делать много, так как наблюдатель никогда не сидит в начале координат. Да и умные товарищи говорят, что очень опасно находиться в центре системы отсчёта. Алгоритм переноса встречается в задачах учёта параллакса. Годичный параллакс — переход из барицентра в центр Земли, суточный — переход из центра Земли в пункт наблюдений.

Для поворота системы координат на заданный угол составляют матрицу поворота и умножают её на вектора положения и скорости. Для поворота против часовой стрелки на угол α вокруг осей OX, OY, OZ используем, соответственно матрицы:

$$R_1(\alpha) = R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix},$$

$$R_2(\alpha) = R_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & 0 & -\sin\alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\alpha & 0 & \cos\alpha \end{pmatrix},$$

$$R_3(\alpha) = R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Рассмотрим самый общий случай. Пусть первая система координат задана единичными векторами $\vec{p}_1, \vec{p}_2, \vec{p}_3$, а вторая - единичными векторами $\vec{q}_1, \vec{q}_2, \vec{q}_3$. Для того чтобы одно описание свести к другому, необходимо знать значения трёх углов и задать порядок поворотов от $O\vec{p}_1\vec{p}_2\vec{p}_3$ к $O\vec{q}_1\vec{q}_2\vec{q}_3$. Пусть F - сферическая широта, а L - сферическая долгота полюса $\vec{q}_3$ в $O\vec{p}_1\vec{p}_2\vec{p}_3$, W - угловое расстояние первого меридиана системы $O\vec{q}_1\vec{q}_2\vec{q}_3$ от узла N экватора $O\vec{q}_1\vec{q}_2\vec{q}_3$ на экваторе $O\vec{p}_1\vec{p}_2\vec{p}_3$. Первая система может быть переведена во вторую тремя последовательными поворотами

$$R_3(W) \cdot R_1(90^\circ - F) \cdot R_3(90^\circ + L).$$

Вот обычная практическая задача: есть вектор с координатами y_1, y_2, y_3 в системе $O\vec{y}_1\vec{y}_2\vec{y}_3$, известны величины F_y, L_y, W_y относительно промежуточной системы координат, известны также величины F_z, L_z, W_z системы $O\vec{z}_1\vec{z}_2\vec{z}_3$ относительно той же промежуточной системы координат. Тогда координаты вектора в системе $O\vec{z}_1\vec{z}_2\vec{z}_3$ определяются посредством шести матриц поворотов

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} = R(W_z, F_z, L_z) \cdot R'(L_y, F_y, W_y) \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{pmatrix},$$

где

$$R(W_z, F_z, L_z) = R_3(W_z) \cdot R_1(90^\circ - F_z) \cdot R_3(90^\circ + L_z),$$

$$R'(L_y, F_y, W_y) = R_3(270^\circ - L_y) \cdot R_1(270^\circ + F_y) \cdot R_3(-W_y).$$

Составим таблицу углов по отношению ко второй экваториальной системе координат, цифрами $1, 2, 3, 4$ обозначены, соответственно, переходы ко второй экваториальной, к первой экваториальной, к эклиптической и к горизонтальной системам,

n	L	F	W
1	0°	90°	0°
2	0°	90°	$270^\circ + S$
3	270°	$90^\circ - \varepsilon$	0°
4	S	φ	270°

где S - местное звёздное время, ε - угол наклонения эклиптики к экватору, φ - широта пункта на поверхности Земли.

Экватор не удержать

Происходит непрерывное изменение положений как объекта, так и наблюдателя. Измерения производятся с Земли в системе TRF. Вычисленные положения и наблюдателя, и объекта необходимо перевести в инерциальную систему отсчёта BRF. Для этого надо описать движение экватора и точки Весеннего равноденствия, но сделать это единой формулой до сих пор невозможно. Тем не менее, взаимные перемещения плоскостей экватора и эклиптики на конечном интервале времени можно выразить в численном виде.

Отчего зависят численные коэффициенты в таких формулах?

Во-первых, это движение эклиптики относительно неподвижной эклиптики вследствие возмущений от планет, во-вторых, движение полюса экватора из-за лунно-солнечного притяжения и, наконец, геодезическая прецессия, равная $1''.92$

за юлианское столетие, вычисляемая в теории относительности и включаемая в движение полюса экватора.

Если первый эффект — перемещение полюса эклиптики — определяется теоретически на основе теорий движения больших планет, то второе явление учитывается введением постоянной прецессии Ньюкома.

В системе основных постоянных МАС1976 есть общая прецессия по долготе в юлианское столетие в стандартную эпоху J2000.0

$$p_A = 5029\overset{''}{.}0966,$$

и наклон эклиптики к экватору в стандартную эпоху J2000.0

$$\varepsilon = 23^\circ 26' 21\overset{''}{.}448.$$

Величины p_A и ε при переходе к другой эпохе меняют свои значения, они переменные. Но на самом деле есть величина

$$P = p_A / \cos\varepsilon$$

связанная с внутренним строением Земли. P — практически постоянный параметр, и то, что в стандарты входит значение p_A - это парадокс, но так происходит потому, что P — не наблюдаемая величина, а p_A определяется из наблюдений.

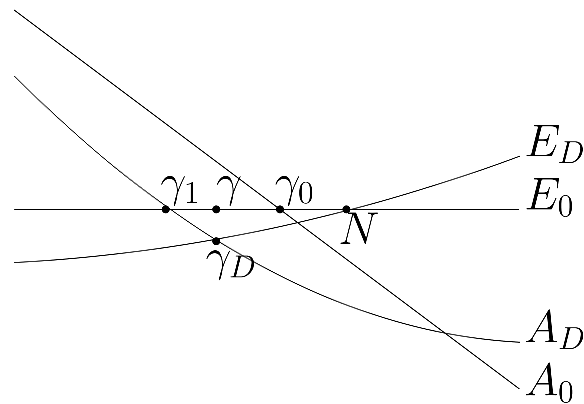
Кинематическая картина прецессии — предварения равноденствий — это движение полюса мира относительно перемещающегося полюса эклиптики.

И совершенно непонятно, что такое общая прецессия по долготе. Споры об этом велись давно и носили академический характер, но сейчас вопрос актуален и ощупывается наблюдениями, нужна ясность. Были приняты две равноправные формулировки: по Ньюкому p_N — долгота мгновенной точки Весны, отсчитываемая на запад по фиксированной эклиптике,

$$p_N = \widehat{\gamma\gamma_0},$$

по Андуайе p_A — разность дуг

$$p_A = \widehat{\gamma_D N} - \widehat{\gamma_0 N}.$$



Две величины обсуждались и оказалось, что

$$p_N = p_A + 0\overset{''}{.}00048 \cdot t^2$$

где

t - время в юлианских столетиях от эпохи J2000.0,

E_0 - фиксированная эклиптика,

E_D - мгновенная эклиптика,

A_0 - фиксированный экватор,

A_D - экватор даты,

N - точка пересечения мгновенной и фиксированной эклиптик,

$\gamma_0, \gamma_D, \gamma_1$ - точки равноденствия в разных системах эклиптики и экватора.

Между эклиптикой и экватором

Для описания движения полюса эклиптики относительно начальной эклиптики с учётом равноденствия даты достаточно величин

Π - дуги $\widehat{\gamma_0 N}$,

π - угла наклона мгновенной эклиптики к начальной,

p_A - постоянной прецессии,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\lambda_D,\beta_D} = R_3(-\Pi - p_A) \cdot R_1(\pi) \cdot R_3(\Pi) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\lambda_0,\beta_0},$$

где векторы в правой и левой частях уравнения отнесены, соответственно, к начальной и мгновенной эклиптикам. Формула преобразования встречается в планетных задачах.

Для описания движения экватора относительно неподвижной эклиптики удобны величины

$\psi_A = \widehat{\gamma_1\gamma_0}$ - лунно-солнечная прецессия, в это значение совсем не входит движение эклиптики,

$\chi_A = \widehat{\gamma_1\gamma_D}$ - прецессия от планет, то есть только движение эклиптики,

ω_A - лунно-солнечный наклон, наклон подвижного экватора к начальной эклиптике.

Вот как связаны положения в системе экватора даты с положениями в системе начальной эклиптики

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\alpha_D,\delta_D} = R_3(\chi_A) \cdot R_1(-\omega_A) \cdot R_3(-\psi_A) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\lambda_0,\beta_0},$$

Величины χ_A , ω_A и ψ_A вычисляются теоретически, наблюдательный аспект пока не ясен.

Третье пробразование наиболее важное и может заменить все остальные: от начального экватора к мгновенному. Три величины ζ_0 , z , θ определяются так, что

$90^\circ - \zeta_0$ - прямое восхождение узла двух экваторов, отсчитываемое по начальному экватору,

$90^\circ + z$ - тот же самый параметр, но отсчитываемый по подвижному экватору,

θ - угол между подвижным и начальным экваторами. Тогда

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\alpha_D,\delta_D} = R_3(-z)\cdot R_2(\theta)\cdot R_3(-\zeta_0)\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\alpha_0,\delta_0}.$$

Удобная формула

$$\cos\delta_D\cdot\sin(\alpha_D - z) = \cos\delta_0\cdot\sin(\alpha_0+\zeta_0),$$

$$\cos\delta_D\cdot\cos(\alpha_D - z) = \cos\delta_0\cdot\cos(\alpha_0+\zeta_0)\cdot\cos\theta - \sin\delta_0\cdot\sin\theta,$$

$$\sin\delta_D = \cos\delta_0\cdot\cos(\alpha_0+\zeta_0)\cdot\sin\theta + \sin\delta_0\cdot\cos\theta,$$

в ней меньше умножений, но на компьютере удобнее перемножить исходные матрицы.

И это тоже Ньюком

Теперь необходимо вычислить значения всех этих углов поворота. Это сделал Ньюком на основе исходных данных и результатов наблюдений, известных 100 лет назад. С новыми значениями масс Солнца, Земли, Луны и планет был выполнен пересчёт. Нашли, чему равны π и Π . Из сферических треугольников получили χ_A , ψ_A , ω_A , из тех же треугольников нашли простые соотношения для прецессионных параметров Ньюкома-Андуайе ζ_0 , z , θ .

Поскольку исходные формулы для величин π и Π являются полиномами по времени, то и формулы для ζ_0 , z , θ получены в том же виде.

$$\zeta_0 = (2306''.2181 + 1''.39656\cdot T - 0''.000139\cdot T^2)\cdot\tau + (0''.30188 - 0''.000344\cdot T)\cdot\tau^2 + 0''.017998\cdot\tau^3,$$

$$z = (2306''.2181 + 1''.39656\cdot T - 0''.000139\cdot T^2)\cdot\tau + (1''.09468 + 0''.000066\cdot T)\cdot\tau^2 + 0''.018203\cdot\tau^3,$$

$$\theta = (2004''.3109 - 0''.85330 \cdot T - 0''.000217 \cdot T^2) \cdot \tau + (-0''.42665 - 0''.000217 \cdot T) \cdot \tau^2 - 0''.041833 \cdot \tau^3.$$

Фундаментальная эпоха E_0 совпадает со стандартной эпохой J2000.0, E_D - эпоха даты, E_F - любая фиксированная эпоха.

$$T = \frac{JD(E_F) - JD(E_0)}{36525},$$

$$\tau = \frac{JD(E_D) - JD(E_F)}{36525}.$$

Величины T и τ , как нетрудно видеть, измеряются в юлианских столетиях.

Повторю еще раз, что формулы справедливы на конечном интервале времени, две - три сотни лет. Экстраполяция здесь не приемлема.

Вот это одно преобразование, со значениями малых углов поворота ζ_0 , z , θ — самое важное, может заменить все остальные соотношения.

Прежде применяли числа Крюгера m и n при определения прецессии по прямому восхождению α и склонению δ , этот способ для звёзд с $|\delta| < 80°$ дает точность $0''.001$, а вот для близполюсных звёзд точность гораздо хуже, поэтому старый способ необходимо исключить. Это следует и из постановления МАС1976 : применять точные формулы и использовать прямоугольные координаты.

В следующий раз рассмотрим вопрос о совместном учёте прецессии и собственных движений.

Когда разгуляется

Хочу закончить о прецессии.

Следует различать среднюю эпоху наблюдений и эпоху

равноденствия, на которую приведены положения и собственные движения.

В каталогах две эти даты обычно не совпадают. Надо учесть изменение координат. Есть ещё и собственные движения, но они тоже относятся к средней эпохе наблюдений, поэтому учесть всё это не так просто.

Вектор положения и вектор скорости запишем в виде

$$\vec{r}(t) = r \cdot \begin{pmatrix} \cos\delta\cos\alpha \\ \cos\delta\sin\alpha \\ \sin\delta \end{pmatrix}$$

$$\dot{\vec{r}}(t) = \dot{r} \cdot \begin{pmatrix} \cos\delta\cos\alpha \\ \cos\delta\sin\alpha \\ \sin\delta \end{pmatrix} + r \cdot \mu_\delta \cdot \begin{pmatrix} -\sin\delta\cos\alpha \\ -\sin\delta\sin\alpha \\ \cos\delta \end{pmatrix} + r \cdot \mu_\alpha \cos\delta \begin{pmatrix} -\sin\alpha \\ \cos\alpha \\ 0 \end{pmatrix},$$

параметры μ_α, μ_δ чаще знаем, величины $r, \dot{r}$ чаще всего не знаем.

Пусть вектор положения и вектор скорости известны в момент t_0 в системе с фиксированными экватором и эклиптикой на эпоху T_0, найдём эти же параметры в момент t_1 в системе, заданной на эпоху T_1.

Первый шаг - переход на момент t_1 в начальной системе координат, второй шаг - учёт прецессии от эпохи T_0 до эпохи T_1. При вычислении прецессионных параметров принимаем, что начальная эпоха T_0 равна фиксированной эпохе E_F, а эпоха T_1 совпадает с эпохой даты E_D. Если обозначить вычисленную матрицу прецессии

$$P(T_0, T_1) = R_3(-z) \cdot R_2(\theta) \cdot R_3(-\zeta_0),$$

то

$$\vec{r}(t_1, T_1) = P(T_0, T_1) \cdot [\vec{r}(t_0, T_0) + \dot{\vec{r}}(t_0, T_0) \cdot (t_1 - t_0)]$$

$$\dot{\vec{r}}(t_1, T_1) = P(T_0, T_1) \cdot \dot{\vec{r}}(t_0, T_0)$$

Запись $r(t, T)$ соответствует значению параметра r в момент t в системе координат, фиксированной на эпоху T. Здесь совершён переход между инерциальными системами.

Выполним теперь преобразование в систему мгновенной эклиптики и подвижного экватора, заданных на любую дату t. Прецессионные величины ζ_0, z, θ зависят от времени посредством параметра τ, дифференцируя, получим выражения для $\dot{\zeta}_0, \dot{z}, \dot{\theta}$, единица измерения времени - юлианское столетие. Каждой матрице поворота $R_i(\alpha)$ поставим в соответствие матрицу $Q_i(\alpha, \dot{\alpha})$ из шести строк и шести столбцов

$$Q_i(\alpha, \dot{\alpha}) = \begin{pmatrix} R_i(\alpha) & 0 \\ \dot{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \alpha} R_i(\alpha) & R_i(\alpha) \end{pmatrix}$$

и образуем матрицу прецессии по правилу

$$P(T_0, t) = Q_3(-z, -\dot{z}) \cdot Q_2(\theta, \dot{\theta}) \cdot Q_3(-\zeta_0, -\dot{\zeta}_0).$$

Преобразование из инерциальной в подвижную систему координат осуществляется по формуле

$$\begin{pmatrix} \vec{r}(t, t) \\ \dot{\vec{r}}(t, t) \end{pmatrix} = P(T_0, t) \cdot \begin{pmatrix} \vec{r}(t_0, T_0) + \dot{\vec{r}}(t_0, T_0) \cdot (t - t_0) \\ \dot{\vec{r}}(t_0, T_0) \end{pmatrix}.$$

Это выражение останется корректным до тех пор, пока используются современные астрометрические каталоги, отнесённые к равноденствию фундаментальной эпохи J2000.0.

При работе со звёздными положениями, заданными в системе FK4, необходимо выполнить предварительные вычисления:

1. исключить эллиптическую аберрацию,

2. совершить поворот к динамическому равноденствию эпохи B1950.0, то есть домножить на матрицу $Q_3(-E, -\dot{E})$, где $E = 0\overset{s}{.}035$ и $\dot{E} = 0\overset{s}{.}085$ в юлианское столетие,

3. скорректировать собственные движения с учетом новой постоянной прецессии и домножить на масштабный фактор, равный отношению продолжительностей юлианского и тропического столетий,
4. перевести положения и скорости звёзд с момента B1950.0 на момент J2000.0 с исправленными собственными движениями,
5. совершить три поворота за прецессию от динамического равноденствия эпохи B1950.0 к фундаментальной эпохе J2000.0.

На практике может возникнуть одна из трёх ситуаций. Прямые восхождения и склонения часто наблюдают отдельно, по этой причине средняя эпоха положений и собственных движений будет различной по двум координатам. По всему каталогу может быть приведена только одна дата для средней эпохи наблюдений, либо такой даты совсем не будет указано. В последнем случае полагаем совпадение эпохи наблюдений и эпохи равноденствия.

При работе со старыми каталогами последовательность действий такая: перейти с даты средней эпохи наблюдений на момент B1950.0, если эпоха равноденствия не равна B1950.0, то совершить поворот за прецессию на основе предыдущего значения постоянной, теперь возможен переход на равноденствие фундаментальной эпохи J2000.0. Способы не точные, но других способов нет, так как в формулы для вектора положения и вектора скорости прямые восхождения и склонения входят вместе, разделения на эти координаты нет.

Ось небесная

Прецессионное движение — одна из составляющих, условно выделяемая из общего движения полюса экватора относительно полюса эклиптики. Нутация обусловлена воздействием Луны и Солнца на реальную Землю. Есть сложности, проблема обсуждается на съездах МАС.

Математическая модель явления: для мгновенной эклиптики и экватора даты различают нутацию в долготе $\Delta\psi$ и нутацию в наклоне $\Delta\varepsilon$. Параметры $\Delta\psi$ и $\Delta\varepsilon$, в свою очередь, суть тригонометрические ряды с численными коэффициентами, аргументами этих рядов являются линейные комбинации фундаментальных аргументов: l - средняя аномалия Луны, l' - средняя аномалия Солнца, F - средний аргумент широты Луны, D - разность средних долгот Луны и Солнца, Ω - средняя долгота восходящего узла Луны. Формулы для вычисления фундаментальных аргументов представляют из себя полиномы по времени.

Проблема имеет свою историю. Открыто явление Брадлеем. В работе 1748 года сообщается, что координаты звезды γ_{Dra} периодически меняются, там же дано правильное объяснение: ось вращения Земли колеблется. В девятнадцатом веке было открыто движение полюсов Земли.Внешние проявления двух явлений похожи, но надо их различать. Путаница возникает тогда, когда не правильно выбрана система координат.

В 1880 году Оппольцер для модели абсолютно твердой Земли установил, что полюс вращения совершает вынужденные колебания по отношению к полюсу фигуры с амплитудой $0.''02$ и с периодом, близким к суткам.

А что же мы получаем из наблюдений? Какая ось колеблется с периодом 18.6 года?

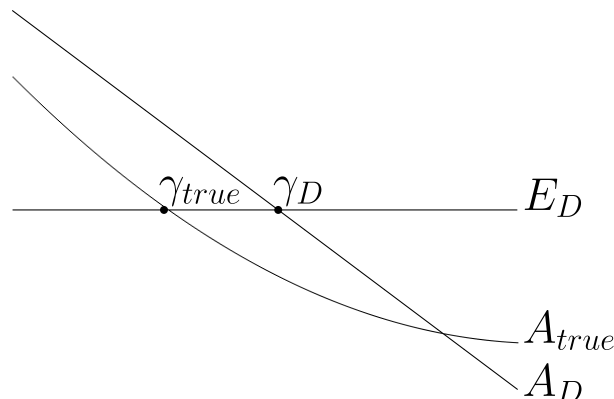
В результате дальнейших исследований догадались, что на амплитуды периодических слагаемых очень влияет внутреннее строение Земли. Экспериментальное определение главного коэффициента нутации приводило к рассогласованиям в амплитудах других периодов.

Пересмотрели старые представления и отказались от разложений, полученных Вулардом в 1954 году.

В настоящее время в качестве стандарта принята теория нутации, представленная Варом в 1980 году. Модель включает в себя твёрдую упругую оболочку и жидкое ядро.

Появился новый термин — эфемеридная ось вращения Земли, которой соответствует небесный эфемеридный полюс. В разложениях для нутации эфемеридной оси вращения периоды всех слагаемых вычисляются на основе теории. Отсутствуют члены, имеющие почти суточный период. В прежнем стандарте, в теории Вуларда, получено решение для прецессии и нутации оси вращения Земли.

Вар использовал модель внутреннего строения Земли Гильберта - Дзевонского. Вычислены амплитуды движения эфемеридного полюса вокруг полюса эклиптики. При сравнении решений, полученных Варом, с одной стороны, и Вулардом, с другой, основные расхождения выявились в амплитудах двухнедельного и полугодового колебаний.



Матрица нутации образована тремя последовательными

поворотами

$$\overline{N} = R_1(-\varepsilon - \Delta\varepsilon) \cdot R_3(-\Delta\psi) \cdot R_1(\varepsilon),$$

где

E_D - мгновенная эклиптика,

A_D - экватор даты,

A_{true} - истинный экватор,

γ_D, γ_{true} - точки равноденствия в разных системах эклиптики и экватора.

ε - наклон мгновенной эклиптики к среднему экватору даты,

$\Delta\psi$ - дуга $\gamma_{\widehat{true}}\gamma_D$,

$\varepsilon + \Delta\varepsilon$ - наклон мгновенной эклиптики к истинному экватору.

Наклон эклиптики к экватору в стандартную эпоху

$$\varepsilon_0 = 23^\circ 26' 21''.448$$

и постоянная нутации в стандартную эпоху J2000.0

$$N = 9''.2025$$

— две определяющие постоянные системы MAC1976.

День - ночь, сутки прочь

Для пользователей и профессиональных астрономов время является запутанным вопросом. Взаимные переходы между шкалами времени вызывают затруднения.

Существуют различные шкалы времени, внутри них — различные системы отсчёта. Трудность ещё и в том, что единицы измерений носят одинаковые названия.

До последней четверти двадцатого века существовало четыре шкалы: звёздное время $S_\oplus^m$, солнечное или Всемирное

время UT, эфемеридное время ET и атомное время TAI. Но и внутри этих шкал каждая обсерватория выбирала свою начальную точку. В новой системе постоянных приняты постановления, отменяющие все предыдущие шкалы.

Звёздное время связано с вращением Земли относительно неподвижных звёзд. Различают среднее, истинное, местное звёздное время.

Наша жизнь регламентируется Солнцем, но Солнце движется неравномерно. Было введено понятие фиктивного среднего солнца, равномерно перемещающегося по экватору. Разность истинного и среднего солнечного времени называют уравнением времени. Эта же величина может быть определена в шкале Всемирного времени UT как момент верхней кульминации Солнца на нулевом меридиане минус 12 часов. Теперь понятия уравнения времени в астрономии не существует, его заменили на момент верхней кульминации Солнца.

Звёздное время определяется из наблюдений прохождений звёзд, и это чисто местное явление. В девятнадцатом веке была установлена неравномерность вращения Земли, и пришлось отменить звёздное время как хранитель равномерной шкалы.

Ввели понятие эфемеридного времени, не связанного с вращением Земли. Именно эфемеридное время ET фигурирует в теориях движения небесных тел.

В середине двадцатого века появилось и атомное время TAI. Точными хранителями шкалы и единицы измерений являются атомы. Это другое физическое воплощение математической абстракции.

Всё это отменили и ввели две новые шкалы: TDB - динамическое барицентрическое время, TDT - земное динамическое время. Единицей двух шкал является секунда СИ на среднем

уровне моря. TDT отличается от TDB только периодическими колебаниями. В шкале TDB построена численная теория движения планет Солнечной системы DE200/LE200.

Осталось подобрать нуль-пункт. Постановили, что в момент 1977 январь 1.0 TAI время TDT = 1977 январь 1.0003725. Разница 0.0003725 суток составляет 32.184 секунды, то есть TDT есть абсолютное продолжение эфемеридного времени.

Практически получают Всемирное координированное время UTC, удобное в повседневной жизни, и мы можем продолжать пользоваться этой шкалой, учитывая поправки для перехода к TDT.

Местное звёздное время — продукт наблюдательной деятельности. При обработке наблюдений учитывают необходимые поправки и используют экваториальные координаты в системе стандартного каталога. Прежде таким списком был FK4, но теперь установлено, что в этой системе нужна поправка средней точки весеннего равноденствия $E = 0\overset{s}{.}035 + 0\overset{s}{.}085 \cdot (y - 1950)/100$ в секундах времени, y - в годах. Вопрос о переходе к новой системе обсуждался на комиссиях МАС и было рекомендовано исправить выражение для гринвичского среднего звёздного времени $S^m_\oplus$ той же поправкой, чтобы избежать разрыва в шкале Всемирного времени UT. В соответствие этим рекомендациям было принято, что

$$S^m_\oplus \text{ в } 0^h \text{ UT1 } = 6^h 41^m 50\overset{s}{.}54841$$
$$+8640184\overset{s}{.}812866 \cdot T_U + 0\overset{s}{.}093104 \cdot T_U^2 - 6\overset{s}{.}2 \cdot 10^{-6} \cdot T_U^3,$$

где T_U - число юлианских столетий от стандартной эпохи. Побежало звёздное время, а Всемирное время не изменилось. Эта формула задаёт среднюю скорость вращения Земли $n_\oplus = 0.72921151467 \cdot 10^{-4}$ радиан в секунду, величина $n_\oplus$ согласована и строго фиксирована.

Промежуток звёздного времени от 0^h UT1 до момента наблюдений равен

$$S^m_\oplus = S^m_\oplus \text{ в } 0^h \text{ UT1 } + r \cdot [(\text{UT1-UTC})+\text{UTC}],$$

где

$$r = 1.002737909350795 + 5.9006 \cdot 10^{-11} \cdot T_U - 5.9 \cdot 10^{-15} \cdot T_U^2.$$

Гринвичское истинное звёздное время $S_\oplus$ вычисляется по формуле

$$S_\oplus = S^m_\oplus + \Delta\psi \cdot \cos\varepsilon.$$

Нет времени - нет работы

Выпишем систему обозначений различных шкал времени в Астрономических ежегодниках.

UT = UT1 - Всемирное время от полуночи в средних солнечных сутках.

UT0 - Всемирное время, не исправленное за движение полюса, есть формула для редукции UT1 = UT0 $-$ $(x_p \sin\lambda + y_p \cos\lambda) \cdot \operatorname{tg}\varphi$, где x_p, y_p - координаты небесного эфемеридного полюса, φ и λ - координаты пункта наблюдения. Величины x_p и y_p определены в левой системе координат, это исключение из правила остаётся и в новом стандарте.

S^m_0 или $S^m_\oplus$ - гринвичское среднее звёздное время.

TAI - шкала атомного времени.

UTC - Всемирное координированное время, отличающееся от TAI целым числом секунд. Разность показаний часов в системах UTC и UT1 не должна превышать 0.7 секунды.

TDT - земное динамическое время, TDT = TAI + $32\overset{s}{.}184$.

В Ежегодниках и Бюллетенях публикуют также поправки

$$\Delta\text{T} = \text{TDT - UT1},$$

$$\Delta \text{UT1} = \text{UT1 - UTC} \ ,$$
$$\Delta \text{TT} = \text{TDT - UTC} \ .$$

На этом можно было бы и закончить описание, но в Астрономических Ежегодниках последнего десятилетия встречаются ещё три шкалы времени:

TT - земное время,

TCG - геоцентрическое координатное время,

TCB - барицентрическое координатное время.

Они рекомендованы МАС в резолюции 1991 года. Основанием для рекомендации послужили неясности и неоднозначности в определении шкал TDB и TDT. Более того, понятие координатного времени, отнесённого к центру масс системы тел, является корректным с точки зрения общей теории относительности.

Шкала земного времени $\text{TT} = \text{TAI} + 32\overset{s}{.}184$ является эквивалентом земного динамического времени.

Шкалы TCB,TDB и TCG,TDT различаются попарно постоянным дрейфом, в разности шкал координатного времени присутствуют как дрейф, то есть член, линейный по времени, так и периодические слагаемые.

Численные эфемериды планет построены в шкале времени TDB, поэтому в рекомендациях МАС разрешено использовать в качестве аргумента динамическое барицентрическое время.

Дела земные

Небесная система координат CRS — это положения и собственные движения звёзд, приведённые в современных каталогах, и координаты 608 удалённых радиоисточников.

Земная опорная система TRF задаётся положениями наблюдательных станций. Прямоугольные координаты обсерваторий на поверхности Земли изменяются как вековым образом по причине смещения тектонических плит, так и периодически. Периодические изменения обусловлены приливами упругой Земли, воздействием океаничеких и атмосферных нагрузочных деформаций.

Положение наблюдательной станции в момент времени t может быть записано в виде

$$\vec{R}(t) = \vec{R}_0 + \vec{V}_0 \cdot (t - t_0) + \sum_i \Delta\vec{R}_i(t).$$

Параметры смещения $\Delta\vec{R}_i(t)$ вычисляются по формулам, выводимым на основе совокупности знаний по физике приливов. Положения $\vec{R}_0$ и скорости $\vec{V}_0$ на начальный момент t_0 — одна из основных забот Международной службы вращения Земли. Ежегодно эти величины публикуются в специальных выпусках.

Разумеется, что и другие параметры, связанные с Землёй, в том числе и коэффициенты разложения гравитационного поля Земли в ряд по сферическим гармоникам, должны быть привязаны к земной опорной системе.

Международная служба вращения Земли создана по решению Международного астрономического союза и Международного геофизического и гедезического союза.

В бюллетенях этой организации (в Интернете по адресу http://hpiers.obspm.fr) можно найти параметры вращения Земли с суточным и пятисуточным интервалом. Среди публикуемых параметров - разность ΔUT = UT1R - UTC и координаты полюса x_p , y_p.

Величины x_p и y_p представляют собой движение небесного эфемеридного полюса, определённого с помощью теории

прецессии и нутации, относительно полюса земной опорной системы. Другими словами, в стандарте предусмотрено, что небесный эфемеридный полюс связан с инерциальной системой отсчёта заранее заданным образом, а положение его относительно опорной земной системы координат является продуктом наблюдательной деятельности.

Параметр UT1R вычисляется следующим образом. Всемирное время, то есть значение UT1, определяется из наблюдений. Приливы упругой Земли, их зональная часть, вызывают периодические изменения момента инерции, и, как следствие, скорости вращения Земли. Периоды таких вариаций, как и периоды нутации, находятся в интервале от нескольких суток до 18.6 года. Амплитуды колебаний известны. Из каждого значения Всемирного времени исключают влияние зональных приливов с периодами короче 35 суток и получают численное значение параметра UT1R. При использовании данных Международной службы вращения Земли разности UT1R-UTC интерполируют на требуемую дату, а затем восстанавливают влияние короткопериодической части зональных приливов.

Преобразование из земной системы координат TRF в небесную CRS на дату наблюдений выполняется по формуле

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{(CRS)} = P' \cdot \overline{N}' \cdot R_3(-S_\oplus) \cdot R_1(y_p) \cdot R_2(x_p) \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{(TRS)}$$

где P - матрица прецессии, $\overline{N}$ - матрица нутации, $S_\oplus$ - гринвичское истинное звёздное время, x_p , y_p - координаты полюса. Верхний штрих означает транспонирование соответствующей матрицы.

Сулит мне труд и горе...

На протяжении последних десятилетий Международный геофизический и геодезический союз, Международная служба вращения Земли, Лаборатория реактивного движения США проводят важнейшие теоретические и практические исследования в области определения численных значений астрономических постоянных и построения инерциальной системы отсчёта. Международная служба вращения Земли на основе большого массива наблюдательных данных получает и регулярно публикует свою систему постоянных и свой стандарт вычислений.

С одним из последних выпусков IERS Technical note 21 , IERS Conventions (1996) , Dennis D.McCarthy можно ознакомиться в Интернете по адресу http://maia.usno.navy.mil/conventions.html .

Конечно, эти публикации не отменяют постановлений МАС 1976 года и более поздних резолюций, но помогают представить вид стандарта астрономических вычислений грядущего.

Много полезного о современном стандарте вычислений можно почерпнуть из пояснений к Астрономическим Ежегодникам последних лет, издаваемых в Санкт-Петербурге под руководством члена-корреспондента Российской Академии наук В.К. Абалакина.

Среди важнейших работ назовём классические мемуары:

Куимов К.В. Редукционные вычисления. /В сб.: Практикум по астрометрии, изд.-во Московского университета,1989,с.6-42.

Идельсон Н.И. Редукционные вычисления в астрономии. /Приложение к Астрономическому Ежегоднику СССР на 1941 год,М.,Л.,изд.-во АН СССР,1940.

Идельсон Н.И. Фундаментальные постоянные астрономии и геодезии. /Приложение к Астрономическому Ежегоднику СССР на 1942 год,М.,Л., изд.-во Академии наук СССР,1941.

Абалакин В.К. Основы эфемеридной астрономии. М.,Наука,1979.

Куликов К.А. Новая система астрономических постоянных. М.,Наука,1969.